

DOI: 10.7652/xjtub201312013

采用结构自适应窗的非局部均值图像去噪算法

郝红侠^{1,2}, 刘芳^{1,2}, 焦李成², 武杰^{1,2}

(1. 西安电子科技大学计算机学院, 710071, 西安; 2. 智能信息感知与图像理解教育部重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对图像去噪处理中的非局部均值(NLM)算法相似性度量结果不够准确的问题,提出了一种采用结构自适应窗的非局部均值图像去噪(SAW-NLM)算法。首先利用从含噪图像中提取的初始素描图将含噪图像划分为结构区和非结构区,然后对这两部分区域分别采用基于结构方向的自适应窗和各向同性窗来搜索相似图像块,最后利用这些相似图像块得到当前待估计像素的去噪结果。为了抑制伪纹理现象,在估计过程中采用了块估计的方式。自适应窗有效结合了图像的结构方向和灰度信息,因此能够更准确度量图像块的相似性。实验结果表明:SAW-NLM 算法具有更优的边缘保持和平滑效果,与传统 NLM 算法相比,峰值信噪比最大可提高 1.1 dB,图像结构相似度也提高了 4.6。

关键词: 图像去噪;度量;结构自适应窗;估计;非局部均值

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X (2013)12-0071-06

A Non-Local Means Algorithm for Image Denoising Using Structure Adaptive Window

HAO Hongxia^{1,2}, LIU Fang^{1,2}, JIAO Licheng², WU Jie^{1,2}

(1. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education of China, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A structure adaptive window based non-local means (SAW-NLM) algorithm for image denoising is proposed to solve the problem that the results of the similarity measurement are not accurate in the non-local means (NLM) method. The proposed algorithm divides a noisy image into two parts, structural area and non-structural area, by using the primal sketch map that is extracted from the noisy image. Then, similar samples are respectively searched in these two parts using structure direction based adaptive window and isotropic window. Finally, the denoising result is estimated from these samples. Moreover, the window-wise method is employed in the estimation of the interest to suppress the pseudo texture phenomenon. Since the structure direction and the gray information are jointly used in the adaptive window, the similarity can be more accurately measured. Experimental results show that the SAW-NLM algorithm has advantages in the edge preservation and smooth effects. Comparisons with the traditional NLM algorithm show that SAW-NLM method improves the peak signal-to-noise by 1.1 dB and the structural similarity index by 4.6.

Keywords: image denoising; measurement; structure adaptive window; estimation; nonlocal means

收稿日期: 2013-06-15。 作者简介: 郝红侠(1980—),女,博士生;刘芳(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB329402);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(K5051203002, K5051203007);国家自然科学基金资助项目(61072106,61173090)。

网络出版时间: 2013-09-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130922.0932.002.html>

图像去噪的目的是从含噪图像中有效地恢复真实信号。其中,“有效”包含2部分内容:滤除噪声并保持边缘结构。很多学者对该问题进行了研究^[1-3],但大都基于图像是分片光滑的假设,利用局部信息来构建去噪模型。近年来提出的非局部均值(Non-local Means, NLM)^[4]将图像的冗余性和自相似性引入到去噪问题中,从非局部范围利用相似像素的加权平均来估计待去噪像素。

NLM算法取得了很好的去噪结果,但其相似性计算完全依赖于2个图像块间的灰度差值,度量不够准确。为此,学者们提出了很多相似度量的改善算法,如文献[5]利用均值和方差度量图像块的相似性,文献[6]采用两阶段的估计方法,结合预去噪结果和噪声残差图来构造新的相似度量。然而,这2种方法只利用了图像的灰度信息,缺乏对图像其他信息,如结构的利用,因此度量的准确性仍有待提高。文献[7]采用结构相似度来改进度量结果,但结构相似度的计算基于图像块的均值、方差等局部统计量,因此只能大致区分出图像结构,不能实现精确的划分。文献[8]利用结构张量估计图像块的局部方向,提高了度量的准确性,但结构张量仅能检测出图像在单一尺度上的局部结构,提取的信息仍不够全面。

为提高相似性度量结果的准确性,本文利用视觉计算中的初始素描图^[9]从多尺度、全局角度提取图像的几何结构信息,将其划分为结构区和非结构区,并针对不同区域像素特性构造自适应的相似比较窗,最后在估计阶段考虑图像块的局部聚集性,采用块估计的方式。实验结果表明,SAW-NLM算法能滤除噪声并保持图像边缘结构,且可以有效去除原NLM算法的伪纹理现象。

1 非局部均值算法

非局部均值算法是由Buades等人提出的针对自然图像加性高斯白噪声的去噪算法^[4]。该算法利用图像的自相似性,通过加权平均一组像素来估计当前待恢复像素的真实值,权值由图像块间的高斯加权欧式距离来计算。

设含噪图像在 i 处像素的灰度值为 $\mathbf{I}(i)$,去噪后 i 点的估计值 $\mathbf{I}_{\text{NL}}(i)$ 为

$$\mathbf{I}_{\text{NL}}(i) = \sum_{j \in \Omega} w(i, j) \mathbf{I}(j) \quad (1)$$

式中: Ω 为以像素 i 为中心的搜索区域; j 为该搜索区域中的像素; $\mathbf{I}(j)$ 为 j 点的灰度值; $w(i, j)$ 为权

值,反映了以像素 i 和 j 为中心的图像块 N_i 和 N_j 的相似程度,满足 $0 \leq w(i, j) \leq 1$ 和 $\sum w(i, j) = 1$,定义如下

$$w(i, j) = \frac{1}{Z(i)} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{I}(N_i) - \mathbf{I}(N_j)\|^2}{h^2}\right) \quad (2)$$

式中: $Z(i) = \sum_{j \in \Omega} \exp(-\|\mathbf{I}(N_i) - \mathbf{I}(N_j)\|^2/h^2)$

为归一化因子; $\mathbf{I}(N_i)$ 和 $\mathbf{I}(N_j)$ 分别为图像块 N_i 和 N_j 的灰度值; h 为控制指数函数衰减速度的参数。

2 基于初始素描图的图像结构划分

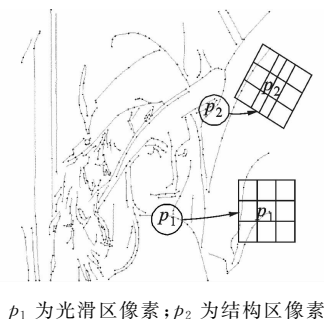
为了利用图像的结构信息,就需要对图像内容进行划分。传统的结构划分主要是一些统计度量方法,如方差、熵、空间频率或它们的组合及一些高阶统计量^[5,10],但这些方法仅考虑图像局部邻域的统计信息,只能实现大致的划分。为得到结构的具体位置,可以采用边缘检测技术^[11],但得到的边缘只是像素级的表征,不含方向信息,且在视觉认知上不够稀疏。将结构划分体现在去噪过程中的典型代表是各向异性扩散方程^[1,12],它利用扩散系数检测像素类型,对光滑和结构区像素使用不同扩散力度,因而在平滑图像时能保持边缘,但该方程解的唯一性和计算稳定性无法得到保证,且扩散参数很难选取,去噪后图像常存在明显的阶梯效应。结构张量^[8]是近些年图像分析的有利工具,它可以检测出局部邻域内信号变化的方向及沿这些方向变化的大小信息,能较好地区分出图像结构和方向,但该方法是在单尺度上的局部检测,因此会造成一些结构信息的丢失。

由于这些方法存在的问题,本文选用初始素描图来进行结构划分。初始素描图是从人类感知的角度进行图像结构提取的算法,它通过构建视觉基元字典,检测图像在多个尺度各个方向的结构,能够得到以线段表示的含有方向信息的视觉基元,是对图像全局结构的高层语义表示。下面介绍初始素描图及基于该素描图的图像区域划分方法。

2.1 初始素描图表示模型

Marr提出的视觉计算理论是计算机视觉中的一个重要成果,主要思想是计算机通过逻辑推理和决策实现人类大脑的处理和解释,生成对外部世界的描述。文献[9]在Marr理论的基础上,给出了初始素描图的数学模型。该模型首先从一组图像中学习出视觉基元字典,并构造一组可以检测不同亮度变化的滤波器作为图像基元字典,然后结合匹配追

踪和格式塔场对结构空间信息的约束建模,提出素描追踪算法,最后利用 MRF 模型对图像中的可素描和不可素描部分建模,得到初始素描图。图 1 为 Lena 图像的初始素描图,由具有不同方向的线段组成。



p_1 为光滑区像素; p_2 为结构区像素

图 1 Lena 的初始素描图

2.2 结构自适应窗和图像区域划分

自然图像的不同区域具有不同特性,因此去噪算法需要考虑这种区别,针对不同区域设计不同的去噪策略。初始素描图将图像分成 2 部分:一部分为含有可辨别的亮度变化的部分,即图像的结构区,如图像中物体的边缘;另一部分为不含可辨别的亮度变化部分,即图像的非结构区。

初始素描图不同于边缘检测,它用点和线段来描述图像结构,线段上的每点都具有方向,同一条线段上所有点的方向一样,但素描图用单像素宽的线段来描述图像结构的主要位置,而图像的边缘结构有一定的范围,因此需要根据线段的位置和方向,进行邻域扩充得到完整的结构区域。

为此,本文提出了结构自适应窗的算法。该窗口有 2 个用途,一是生成图像的结构区域,二是比较结构区像素的相似性。结构自适应窗示意图如图 1 中以 p_2 为中心的正方形窗口,即以初始素描图中像素为中心取正方形窗口,窗口中心轴方向与该点所在线段方向平行,并认为正方形区域为该点所在的结构区域。对初始素描图上的每个像素做相同处理,最终得到图像区域划分结果,如图 2 所示。



黑色线条表示结构图;除黑色线条外的其他部分为非结构区

图 2 图像区域划分示意图

3 结构自适应窗的非局部均值去噪

得到图像的区域划分后,将根据区域特性分别对 2 部分去噪。

首先,非结构区的特点是像素是各向同性的,且具有相似的灰度值。然而,传统 NLM 考虑了非局部性,却忽略了局部相关性。它对每个像素独立进行相似性搜索,即使是空间上相邻的 2 个像素,估计过程也是完全独立的。它没有利用像素的局部聚集性,使得局部邻域的像素灰度值缺乏一致性,导致去噪后图像出现了很多弯曲状痕迹,称为伪纹理(这在后面的实验中传统 NLM 算法的去噪结果能够看到,如 Lena 的脸部和 Boat 的天空等部分),因此本文在去噪过程中引入图像块的局部聚集性来抑制伪纹理现象。

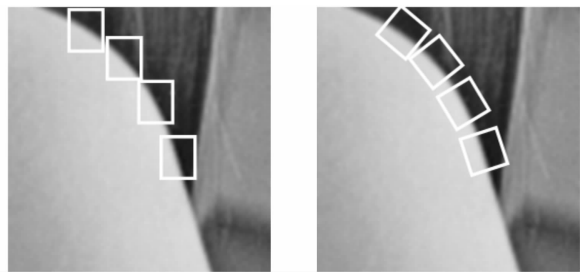
设非结构区中某待去噪像素为 p ,其行列坐标为 $i=0, \dots, M, j=0, \dots, N, M \times N$ 为图像大小,以该像素为中心做自适应窗 N_p ,取法如图 1 中 p_1 所在窗口,对该窗内的所有像素采用下式去噪

$$\hat{\mathbf{I}}(p_{i+k,j+l}) = \sum_{q \in S_p} \frac{\mathbf{I}(q_{i+k,j+l})}{Z(p)} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{I}(N_p) - \mathbf{I}(N_q)\|^2}{h^2}\right) \quad (3)$$

式中: $Z(p) = \sum_{q \in S_p} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{I}(N_p) - \mathbf{I}(N_q)\|^2}{h^2}\right)$ 为归一化因子; h 为衰减参数; $p_{i+k,j+l}$ 为第 $i+k$ 行、第 $j+l$ 列的自适应窗 N_p 中像素, $k, l = -f, \dots, 0, \dots, +f, f$ 为控制窗口大小的参数; $\hat{\mathbf{I}}(p_{i+k,j+l})$ 为该窗口内所有像素的去噪估计值; S_p 是以像素 p 为中心的搜索区域; q 为搜索窗中的像素; N_q 表示以 q 为中心的相似比较窗,与 N_p 一样,也为结构自适应窗; $\mathbf{I}(N_p)$ 和 $\mathbf{I}(N_q)$ 为窗口内所有像素对应的灰度值。

其次,结构区像素的特点是不同结构上的像素具有不同方向,灰度值呈现出沿结构方向聚集的特性。然而,传统 NLM 忽略了像素方向,采用各向同性窗口来比较相似性,因而度量不够准确。图 3 中的白色小方块表示进行相似比较的窗口。图 3a 为传统 NLM 的各向同性窗,可以看到每幅图中 4 个窗口中心像素的灰度值非常接近,本应具有很高的相似度量,但由于中心像素的结构方向不同,这些各向同性窗口内像素的灰度分布就不尽相同,因此原本相似的像素被判断成不相似像素,最终在加权平均时影响估计的准确性,造成边缘模糊。

为了克服这一缺陷,结构区像素的相似性测量就不能沿用传统的各向同性窗,而要用像素的结构



(a)NLM 的各向同性窗 (b)SAW-NLM 的结构自适应窗

图 3 各向同性窗与结构自适应窗示例

来调整。这里采用上节提出的结构自适应窗作为相似比较窗。窗口取法如图 1 中 p_2 所在窗口,由于经过旋转后的窗口像素具有相同的灰度分布,因此也可以像非结构区那样,利用相似比较窗口内同一位置的像素对当前窗口内该位置的像素进行估计,具体方法仍按式(3)计算。

结构自适应的相似比较窗如图 3b 所示,由于初始素描图给出了图像中所有结构的方向,因此可以对图 3a 中各向同性窗根据结构方向进行旋转,即得到了结构自适应窗。该窗口克服了图像结构差异对相似性判断的影响,使得图像块灰度值的差异能够真实反映出中心像素的差异。

4 仿真实验和结果分析

为了验证本文 SAW-NLM 算法的有效性,对比其他 3 种算法,对一组大小为 512×512 像素的 Lena、Barbara、Peppers 和 Boat 自然图像进行去噪,

通过峰值信噪比(R_{PSN})和结构相似度(Q_{SSIM})指标进行评价。实验中,噪声强度为 10~40 dB,结构自适应窗口大小为 7×7 像素。仿真结果如表 1、表 2 所示。

从表 1 可以看出,SAW-NLM 算法在 R_{PSN} 上比传统 NLM 和文献[8]算法都有了较明显提升,但与 BM3D 算法还有一些差距。BM3D 的优势主要体现在较高的峰值信噪比^[13],这是由于基础估计步骤中的非局部分块匹配和变换域中联合滤波实现了对图像的高度稀疏表示,使得噪声系数和真实信号系数被充分分离。此外,最终估计步骤中的维纳滤波也在一定程度上恢复了被基本估计弱化的图像细节,因此有效去除了噪声。

由于峰值信噪比是基于误差的度量方法,用原始图像与被测图像的数学距离来表示图像间的差异程度,虽然计算简单,物理含义清晰,但没有考虑人类视觉系统(Human Visual System, HVS)特性,仅将图像看作是数学意义上的二维信号,不关注图像的各种视觉属性,如亮度、对比度、边缘纹理结构、方向、光滑度等,而 HVS 对图像的这些属性却是非常敏感的,因此峰值信噪比比较的是数学意义上的数值差异,不是人类视觉感知的变化失真,有时会出现主客观分析不一致的情况。为进一步验证 SAW-NLM 算法的有效性,采用结构相似度^[14]指标 Q_{SSIM} 进行了测试,结果如表 2 所示。表 2 结果表明,SAW-NLM 算法在该指标上均优于其他算法,与主观评价方法取得了一致的结果。

表 1 4 种去噪算法的峰值信噪比(R_{PSN})比较 dB

算法	Lena				Barbara				Peppers				Boat			
	$\sigma=10$	$\sigma=20$	$\sigma=30$	$\sigma=40$	$\sigma=10$	$\sigma=20$	$\sigma=30$	$\sigma=40$	$\sigma=10$	$\sigma=20$	$\sigma=30$	$\sigma=40$	$\sigma=10$	$\sigma=20$	$\sigma=30$	$\sigma=40$
NLM	34.25	31.56	29.26	27.94	32.79	29.31	26.56	25.93	32.28	30.21	28.70	28.19	32.10	29.58	26.71	25.69
BM3D	35.64	32.98	30.49	28.64	34.29	30.30	27.62	27.21	33.75	31.19	30.34	29.93	33.62	30.88	29.11	27.74
文献[8]	34.62	31.84	29.76	28.02	33.15	29.73	26.98	26.62	34.10	30.51	28.95	28.63	32.64	29.71	26.86	26.06
SAW-NLM	35.23	32.48	30.03	28.21	33.84	29.98	27.15	26.84	33.23	30.75	29.32	28.79	33.21	29.96	26.90	26.12

表 2 4 种去噪算法的结构相似度(Q_{SSIM})比较 %

算法	Lena				Barbara				Peppers				Boat			
	$\sigma=10$	$\sigma=20$	$\sigma=30$	$\sigma=40$	$\sigma=10$	$\sigma=20$	$\sigma=30$	$\sigma=40$	$\sigma=10$	$\sigma=20$	$\sigma=30$	$\sigma=40$	$\sigma=10$	$\sigma=20$	$\sigma=30$	$\sigma=40$
NLM	90.01	84.12	78.39	74.90	92.61	85.72	80.23	73.92	86.48	80.74	75.78	72.14	86.50	77.34	70.32	65.06
BM3D	91.17	86.10	81.49	77.22	93.95	88.16	84.11	77.95	87.56	82.89	78.86	75.02	88.46	80.14	74.28	69.29
文献[8]	90.81	85.09	80.18	76.13	93.19	86.63	81.65	76.42	87.11	81.51	77.62	73.54	87.17	78.59	72.23	67.48
SAW-NLM	91.76	86.62	81.91	77.53	94.46	88.78	84.57	78.30	87.98	83.23	79.26	75.24	88.97	80.73	74.69	69.67

对图像去噪的对比结果如图 4~图 7 所示。可以看出,SAW-NLM 算法具有更好的主观视觉效果,不但非结构区处理得非常平滑,几乎没有伪迹,而且结构保持也很清晰。在图 6b 中 Lena 的脸部,NLM 去噪结果中存在伪纹理现象,这是由于相似块度量不够准确,且没有考虑图像的局部相关性导致的。BM3D 结果也出现了较明显的斑块效应,一些细节结构保持效果也欠佳,如图 7b 中 Boat 的桅杆等细节。由于块多了会影响三维变换的稀疏性,因此 BM3D 块匹配时为了保证组内块的高度相似性,每组仅采用 16 个相似块。然而,对于估计问题来说,相似块越多,估计效果应该越好,因此相似块的数量和稀疏性存在无法缓解的矛盾。再者,BM3D 的块匹配采用和传统 NLM 相同的各向同性

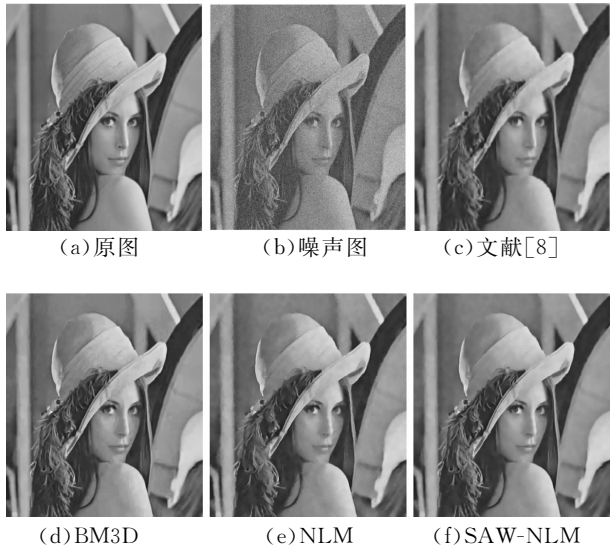


图 4 Lena 图像在噪声 $\sigma=30$ 时 4 种算法的去噪结果

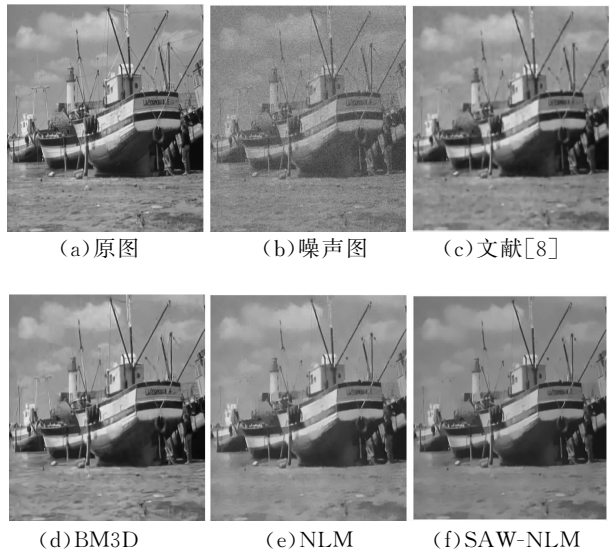


图 5 Boat 图像在噪声 $\sigma=30$ 时 4 种算法的去噪结果

窗,块的相似性度量结果存在一定偏差。因此,基于这些块进行联合滤波后得到的对图像块的估计就必然存在一定误差,反映在图上就呈现出斑块效应,而 SAW-NLM 算法由于采用了区域划分和结构自适应窗的度量方法,因此能够保证找到的图像块具有较高的相似性,而且 SAW-NLM 算法结构区像素的搜索范围是整幅图像中和当前待估计像素具有相近方向的结构区像素,能找到更多的相似样本,保证了估计方法对样本在精度和数量上的要求。



图 6 对图 4 部分结果的放大图

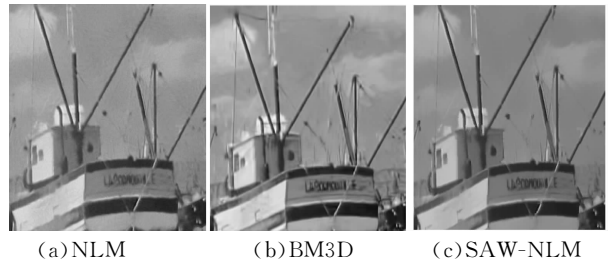


图 7 对图 5 部分结果的放大图

5 结 论

本文利用初始素描图将图像分为结构区和非结构区,针对 2 部分像素的不同性质采用不同方法去噪,且相似性搜索仅在同类型区域中进行。对非结构区考虑了空间相邻像素的局部聚集性,很好抑制了伪纹理现象;对结构区考虑了结构方向,设计了结构自适应的相似比较窗,经旋转后窗内像素具有相同的灰度分布,准确度量了对应像素的相似性,去噪同时边缘保持良好,视觉效果也更加平滑。

参考文献:

[1] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629-639.

[2] 张闯,迟健男,张朝晖,等. 基于边缘检测与双边滤波的彩色图像去噪 [J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1776-1783.

ZHANG Chuang, CHI Jiannan, ZHANG Zhaohui, et

- al. Removing noise of color image based on edge detection and bilateral filter [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(8): 1776-1783.
- [3] JUMAH A A. Denoising of an image using discrete stationary wavelet transform and various thresholding techniques [J]. *Journal of Signal and Information Processing*, 2013, 4(1): 33-41.
- [4] BUADES A, COLL B, MOREL J M. Nonlocal image and movie denoising [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 76(2): 123-139.
- [5] COUPE P, YGER P, PRIMA S, et al. An optimized blockwise non-local means denoising filter for 3-D magnetic resonance images [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2008, 27(4): 425-441.
- [6] ZHONG Hua, CHENG Yang, ZHANG Xiaohua. A new weight for non-local means denoising using method noise [J]. *Signal Processing Letters*, 2012, 19(8): 535-538.
- [7] 易子麟, 尹东, 胡安洲, 等. 基于非局部均值滤波的 SAR 图像去噪 [J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(4): 950-955.
- YI Zilin, YIN Dong, HU Anzhou, et al. SAR image despeckling based on non-local means filter [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 950-955.
- [8] GREENIG S, ZIMMERB S, WEICKERTA J. Rotationally invariant similarity measures for nonlocal image denoising [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2011, 22(2): 117-130.
- [9] GUO Chengen, ZHU Songchun, WU Yingnian. Primal sketch: integrating texture and structure [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2007, 106(1): 5-19.
- [10] CHENG Hengda, XUE Mei, SHI Xiangjin. Contrast enhancement based on a novel homogeneity measurement [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(11): 2687-2697.
- [11] 朱磊, 水鹏朗, 章为川, 等. 利用区域划分的合成孔径雷达图像相干斑抑制算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(10): 83-89.
- ZHU Lei, SHUI Penglang, ZHANG Weichuan, et al. A despeckling algorithm for synthetic aperture radar image using region subdivision [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(10): 83-89.
- [12] LI H C, FAN P Z, KHAN M K. Context-adaptive anisotropic diffusion for image denoising [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(14): 827-829.
- [13] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [14] WANG Zhou, BONIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.

(编辑 刘杨)

(上接第 37 页)

- [11] ZHOU R, BAO W, LI N, et al. Mechanical equipment fault diagnosis based on redundant second generation wavelet packet transform [J]. *Digital Signal Processing*, 2010, 20(1): 276-288.
- [12] CHANG C S, JIN J, KUMAR S, et al. Denoising of partial discharge signals in wavelet packets domain [J]. *IEE Proceedings: Science Measurement and Technology*, 2005, 152(3): 129-140.
- [13] HAO Z, BLACKBURN T R, PHUNG B T, et al. A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements: part 2 On-site noise rejection application [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(1): 15-22.
- [14] ZHOU C, MICHEL M, HEPBURN D M, et al. On-line partial discharge monitoring in medium voltage underground cables [J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2009, 3(5): 354-363.
- [15] 曹瑞峰, 张保会, 罗四倍, 等. 输电线路超高速保护中小波算法的研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(2): 194-198.
- CAO Ruifeng, ZHANG Baohui, LUO Sabei, et al. Algorithms of wavelet transform in ultra-high speed protection for transmission line [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(2): 194-198.
- [16] 丁伟民. 矿用高压电缆状态监测及故障诊断预警系统的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [17] 段晨东, 何正嘉. 第二代小波降噪及其在故障诊断系统中的应用 [J]. *小型微型计算机系统*, 2004, 25(7): 1341-1343.
- DUAN Chendong, HE Zhengjia. Second generation wavelet denoising and its application in machinery monitoring and diagnosis [J]. *Mini-Micro Systems*, 2004, 25(7): 1341-1343.

(编辑 杜秀杰)